

Le magnétisme

- Magnétisme : « *ensemble des phénomènes que présentent les matériaux aimantés* », Dictionnaire Larousse
- Historique :
 - Antiquité dans l'ancienne cité d'Asie Mineure **Magnésie** : des pierres attirent le fer
 - An 1000 : invention du poisson-montre-sud en Chine
 - 1821 : **Oersted** relie le **courant** au champ magnétique
- Notion d'**action à distance**
 - Des objets sont attirés ou repoussés
- Remarques :
 - On s'y intéresse en électrotechnique
 - Des applications bien **au-delà** de l'électrotechnique

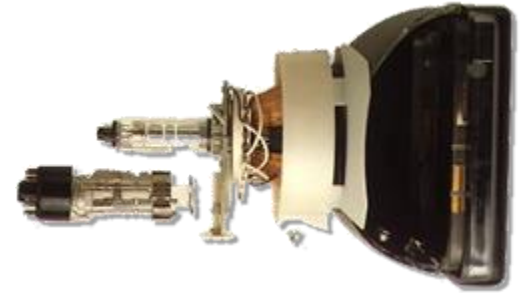
Le champ magnétique : nombreuses applications



La boussole



L'aimant



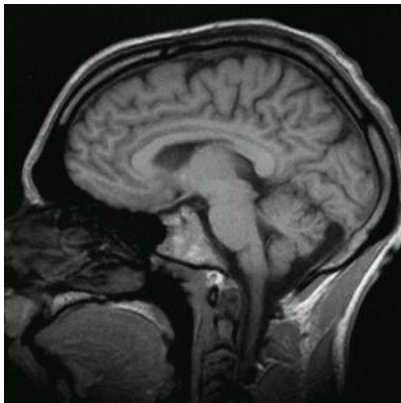
Le tube cathodique



Le disque dur



La carte bancaire



L'IRM



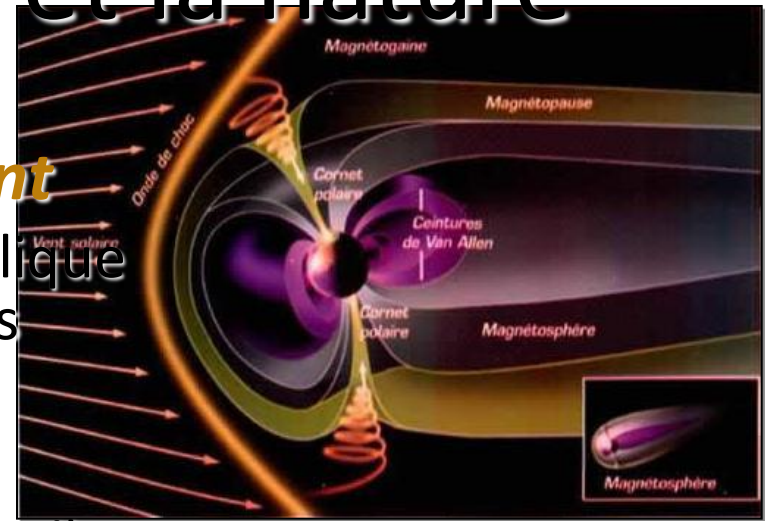
Le train



La sustentation magnétique

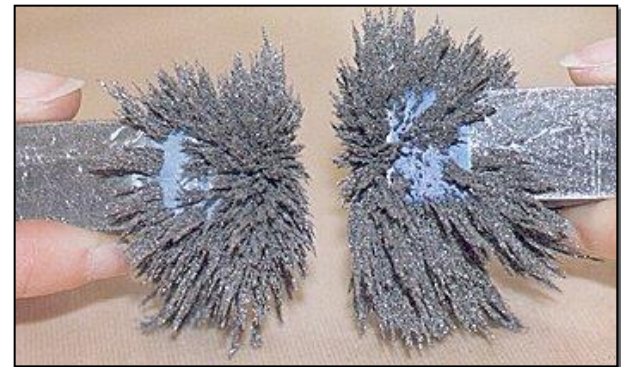
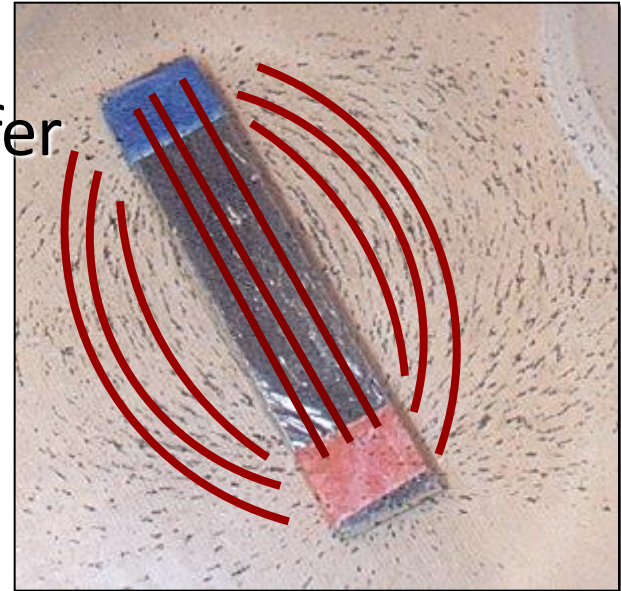
Le magnétisme et la nature

- La Terre est un **énorme aimant**
 - Mouvements du noyau métallique liquide des couches profondes de la Terre
- Manifestation :
 - Aurores polaires : australes (sud) et boréales (nord)
 - Collision particules chargées et ionosphère
- La matière **réagit** au champ magnétique
 - Aimantation



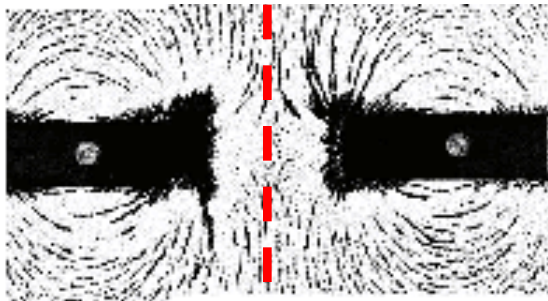
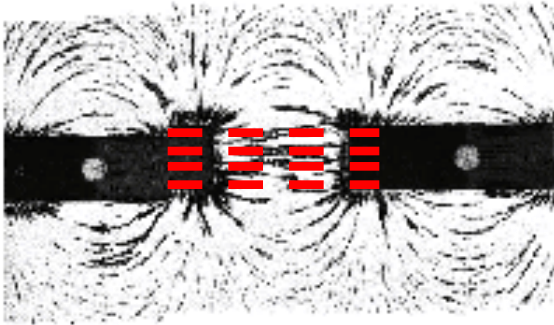
Les aimants et les lignes de champ

- Champ magnétique $\Leftrightarrow$ Force
- Observation :
 - Un aimant et de la limaille de fer
 - On observe une orientation
 - Lignes d'une extrémité vers l'autre
- Que dire des extrémités ?
 - Les lignes y sont plus proches
 - L'aimantation y est maximale
 - Ce sont les **Pôles** de l'aimant



Les aimants et leurs pôles

- Deux pôles : un pôle *nord* et un pôle *sud*
- Comment interagissent-ils ?

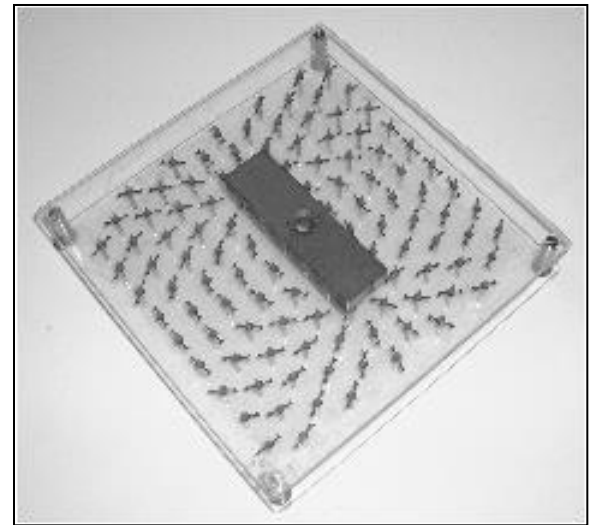


- Pôles opposés en vis-à-vis (NS ou SN)
 - Effet d'attraction
 - Lignes de « jonction » entre les aimants
- Mêmes pôles en vis-à-vis
 - Effet de répulsion
 - Ligne de séparation entre les aimants

Les lignes de champ magnétique

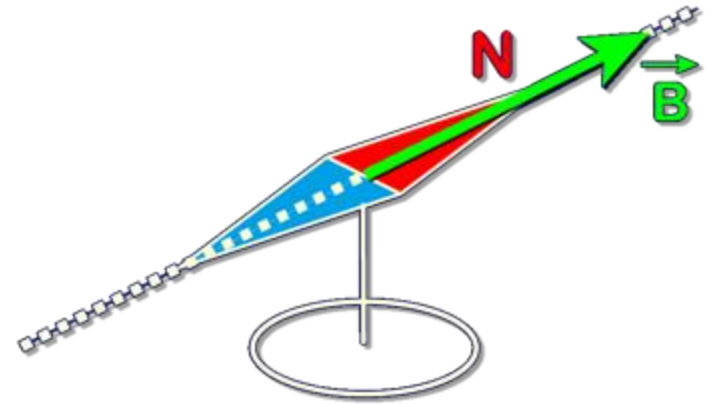
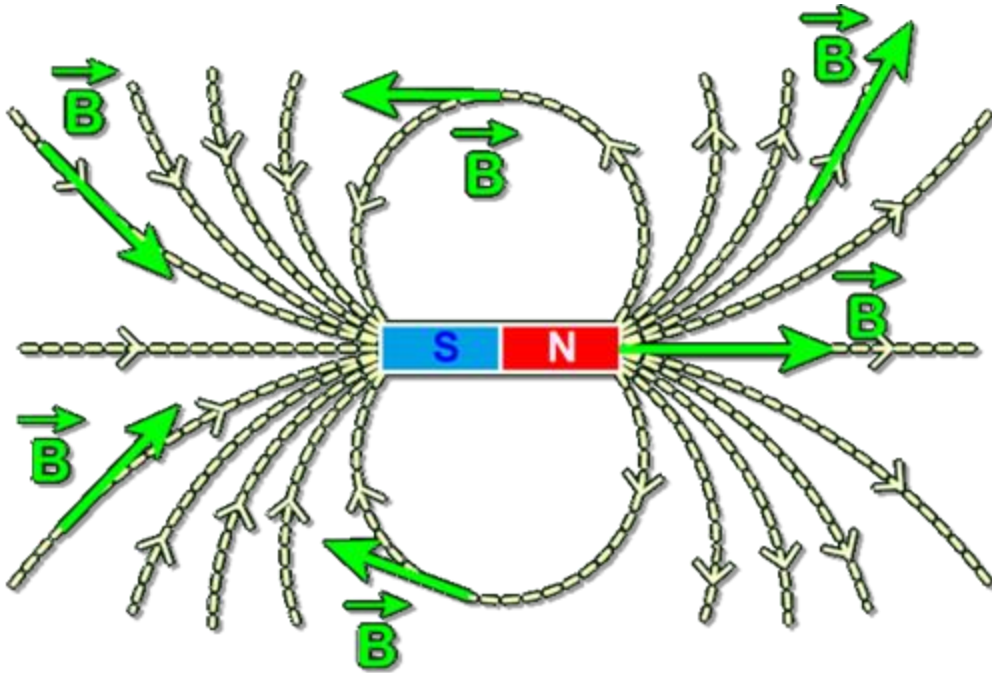
- La limaille de fer est orientée selon les lignes de champ magnétique
- On voit ainsi les effets du champ magnétique
- Nous avons donc défini la **direction** des lignes de champ

Sens ?



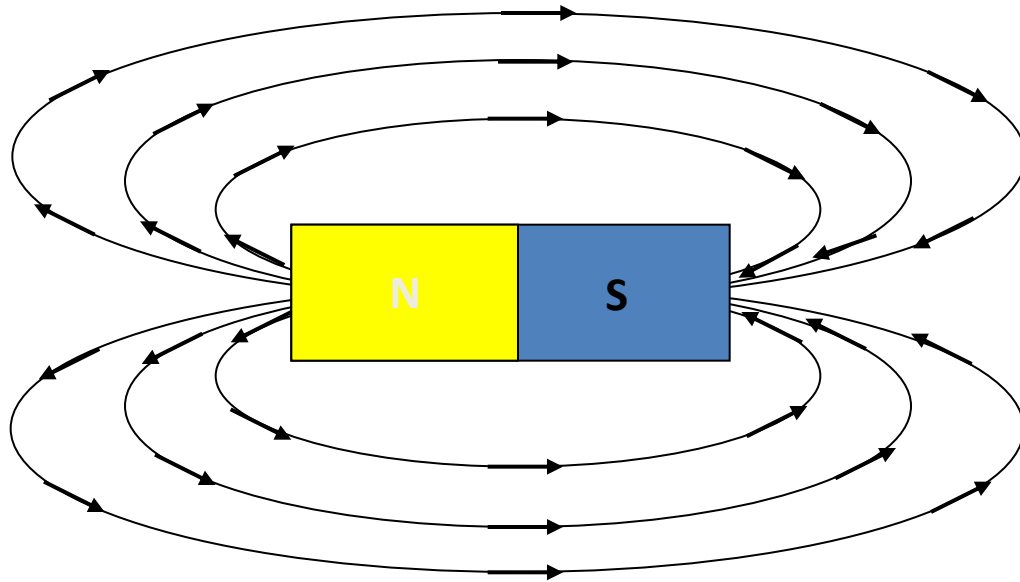
Expérience de la limaille, réalisée avec des boussoles ⇒

Le sens des lignes de champ magnétique



- Elles « *entrent au pôle sud* » et « *sortent du pôle nord* »
- Si l'on met une boussole, le champ la traverse depuis le Sud vers le Nord

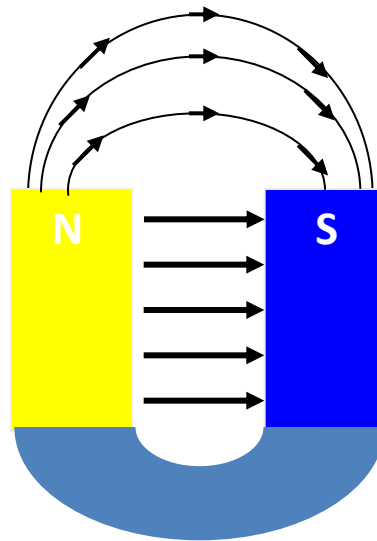
Exemples de champs magnétiques



Les lignes de champ magnétique s'éloignent du pôle nord et s'approchent du pôle sud.

Elles indiquent l'orientation d'une boussole placée près de l'aimant.

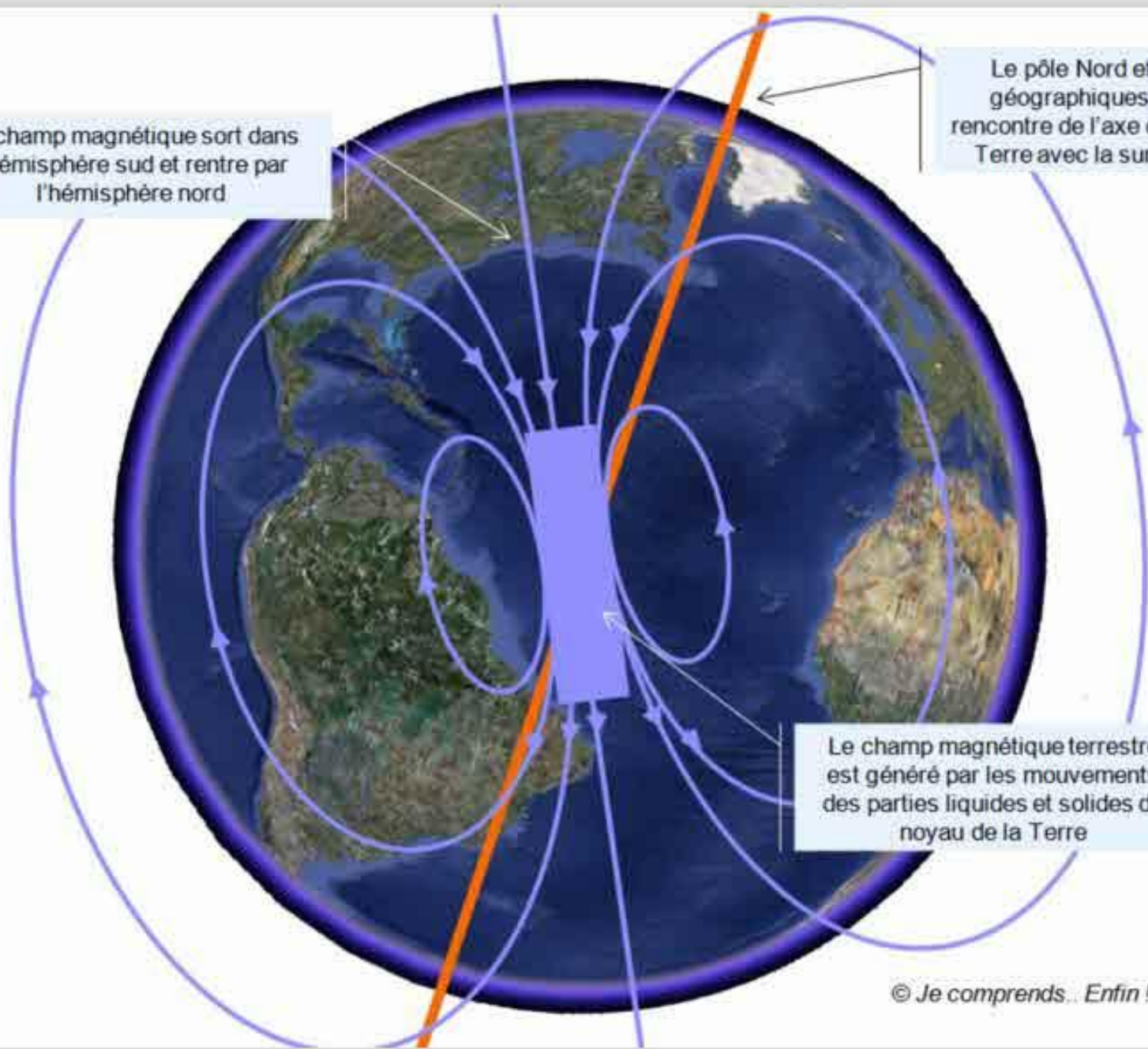
Champ magnétique d'un aimant en fer de cheval

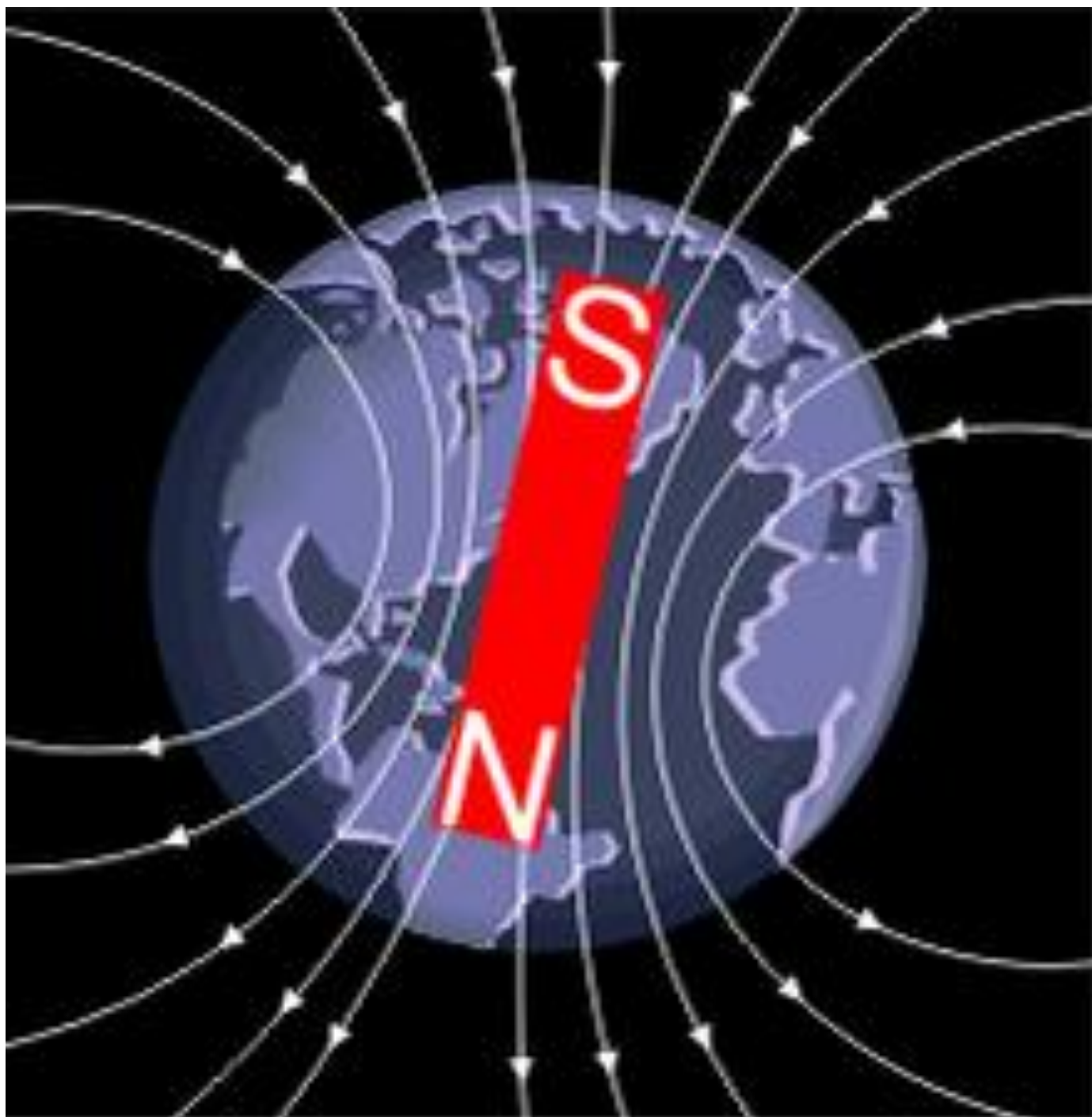


Le champ magnétique sort dans l'hémisphère sud et rentre par l'hémisphère nord

Le pôle Nord et le pôle Sud géographiques Marquent la rencontre de l'axe de rotation de la Terre avec la surface du globe

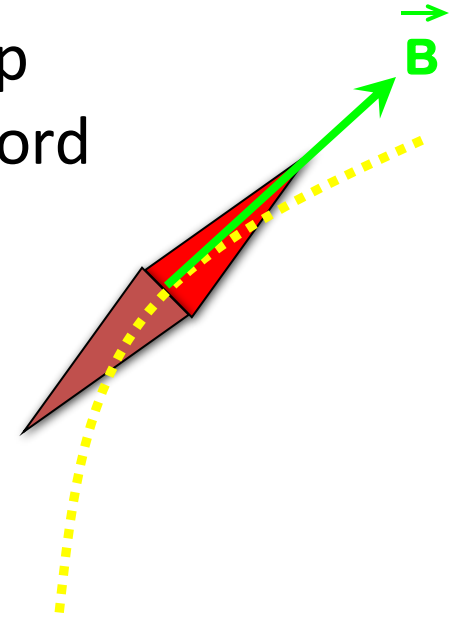
Le champ magnétique terrestre est généré par les mouvements des parties liquides et solides du noyau de la Terre





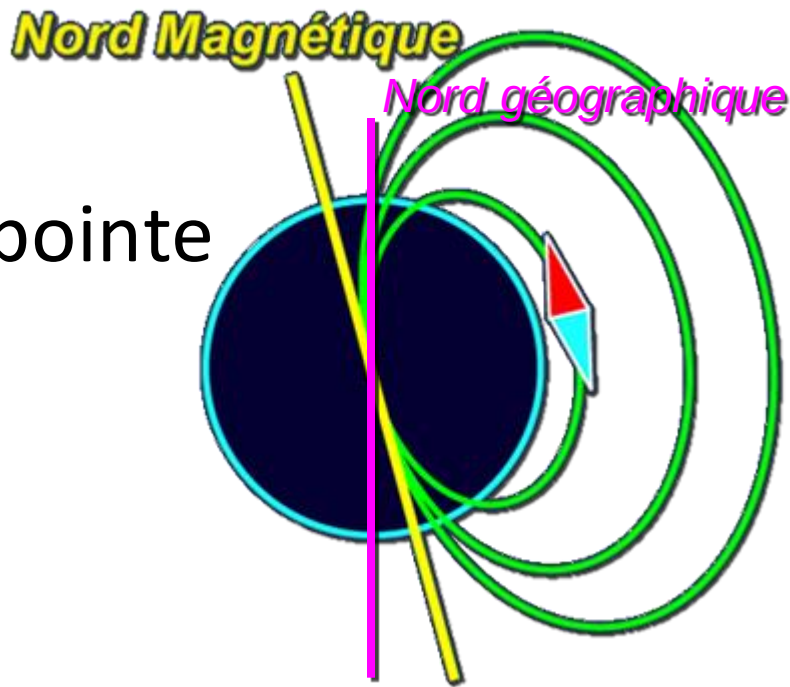
Le champ d'induction magnétique B

- Le champ magnétique a une direction, un sens et une intensité : on le représente par un vecteur.
 - **Direction** : tangente à la ligne de champ
 - **Sens** : rentre par le Sud et sort par le Nord
 - **Intensité** : est donnée en Tesla
 - ⇒ Grande unité !
(Champ magnétique terrestre : $20 \mu\text{T}$)
- L'intensité :
 - Elle varie fortement avec la distance
 - Plus on est loin de l'aimant, plus le champ est faible
 - Est **plus grande** lorsque les **lignes** de champ sont **plus resserrées**
 - B : densité de lignes de champ



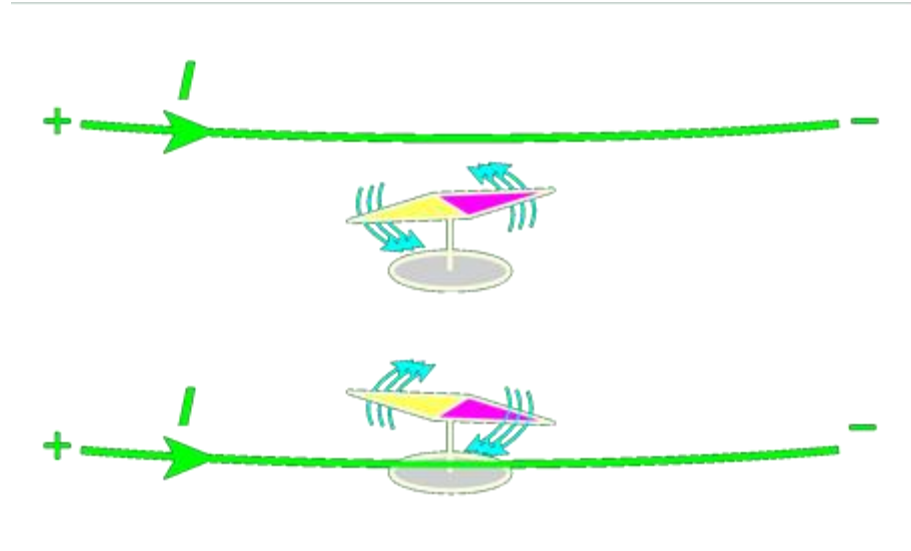
Et la Terre ?

- Boussole indique le **Nord**
 - Nord magnétique & nord géographique
 - Distants de 1900 km
 - Déclinaison magnétique
- Le pôle nord d'une boussole pointe vers le nord magnétique
- Mais le nord d'un aimant est attiré par un pôle sud !!!
- Erreur :
 - Le **pôle nord magnétique** est en fait un **pôle sud** !
 - On ne corrige pas pour plus de simplicité
 - Inversion de la polarité ~ 250 000 ans



L'expérience d'Oersted (1820)

L'expérience d'Oersted (1820)

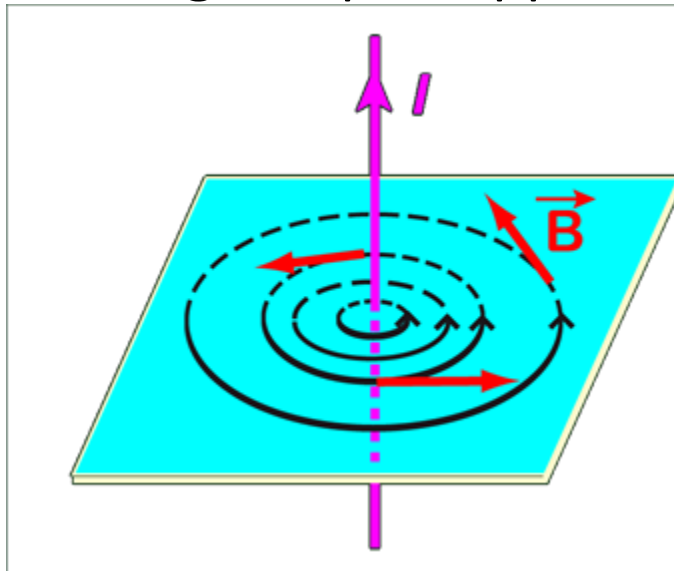


Le courant électrique n'agit pas que dans le conducteur mais crée une **force magnétique** dans son environnement

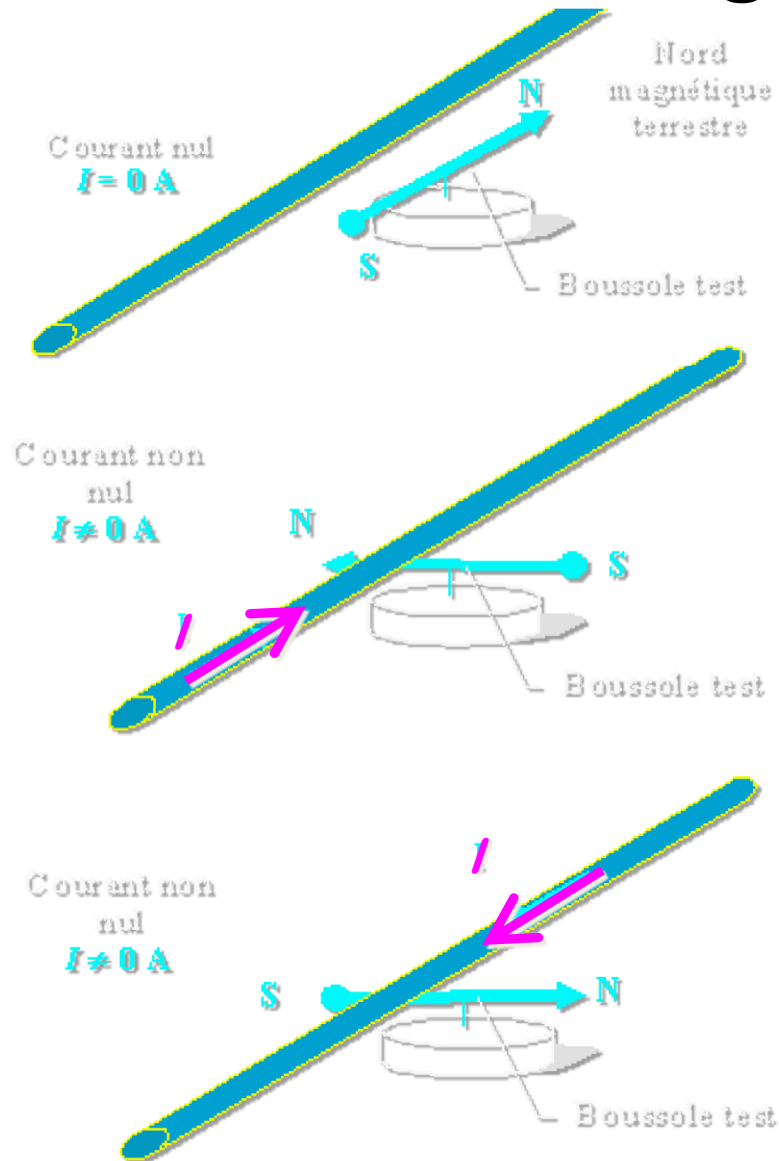
- Position de la boussole : influence le sens de rotation
- Le champ magnétique n'a pas le même sens en dessus et en dessous du fil

La conclusion d'Oersted

- « Il est évident que les forces du conflit électrique sont **circulaires** car en l'absence d'une telle hypothèse, il paraîtrait impossible que le courant puisse faire tourner l'aiguille aimantée vers l'**Est** quand elle est placée **en dessous du fil** et vers l'**Ouest** quand elle est **placée dessus**. »
- Le champ magnétique décrit un cercle autour du fil électrique
 - La position de l'aiguille par rapport au fil influence sa direction

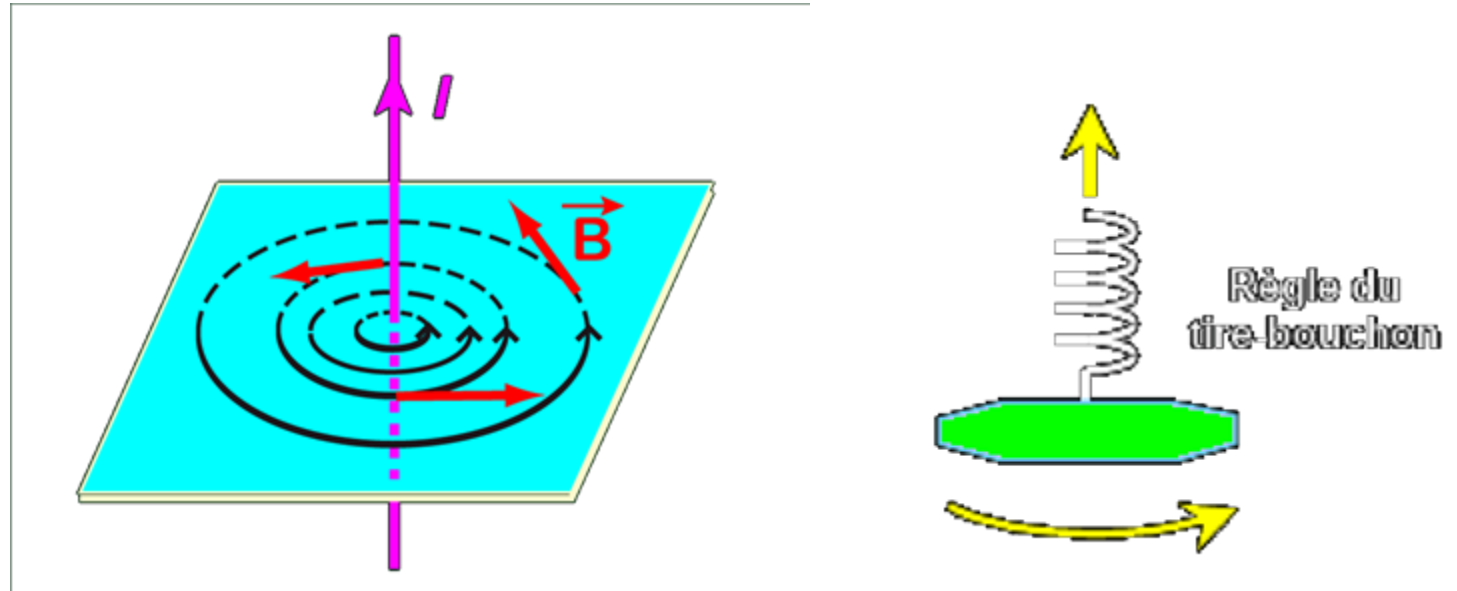


Sens du courant et champ magnétique



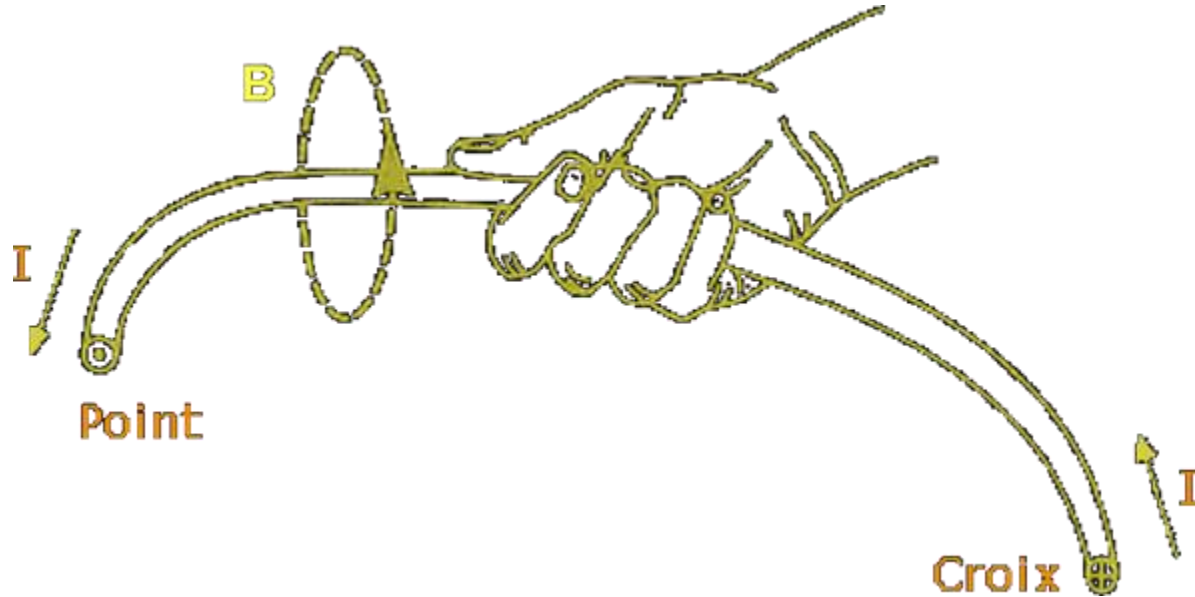
- On change le sens du courant
- La boussole pointe dans l'autre direction
- Le champ magnétique crée dépend de l'**intensité** et du **sens** du courant

Convention : la règle du tire-bouchon



- « Imaginons avoir un tire-bouchon disposé le long du conducteur, et de le faire tourner de sorte qu'il se déplace dans le **même sens que le courant**. Le **sens de rotation** du tire-bouchon indique le sens **des lignes de champ magnétique**. »

Autre règle : la règle de la main droite



- *Lorsqu'un fil est parcouru par un courant de sens connu, la direction et le sens du champ magnétique induit B sont donnés par les doigts de la main droite lorsque le pouce est dans le sens du courant.*
- Ça marche dans les deux sens : on peut intervertir le rôle du courant et celui du champ magnétique dans cette règle

Calcul de B : la loi de Biot & Savart

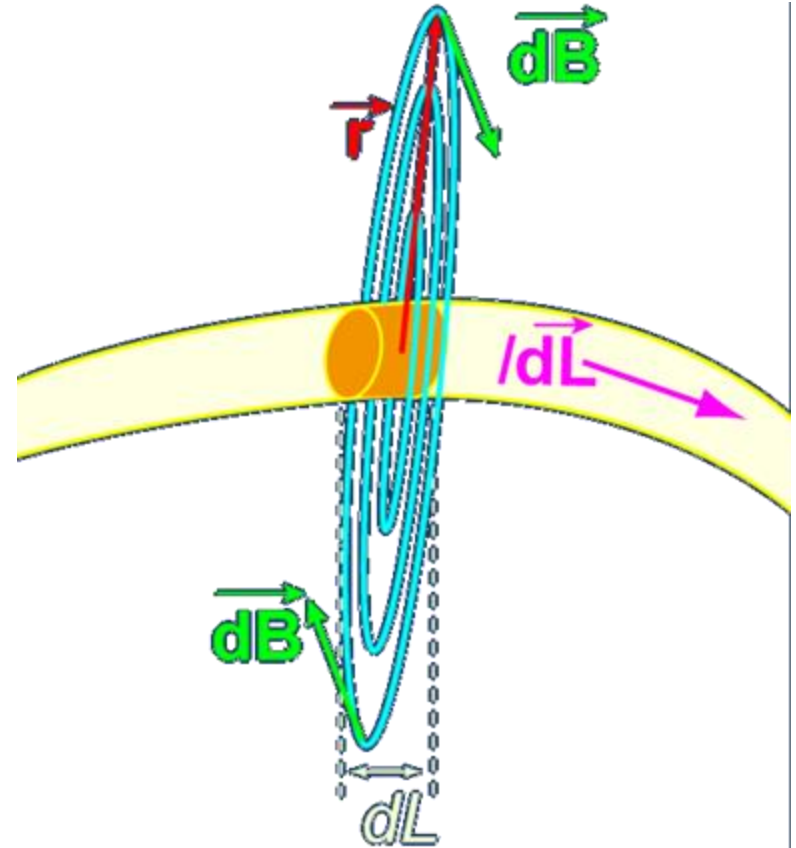
- Que vaut le champ magnétique créé par un *élément de circuit* ?
 - Loi de *Biot et Savart* :

*Vecteur orienté du conducteur
vers le point de calcul*

$$d\vec{B} = \frac{\mu_0}{4\pi} I d\vec{L} \wedge \frac{\vec{r}}{r^3}$$

*Élément de longueur
(orienté, en m)*

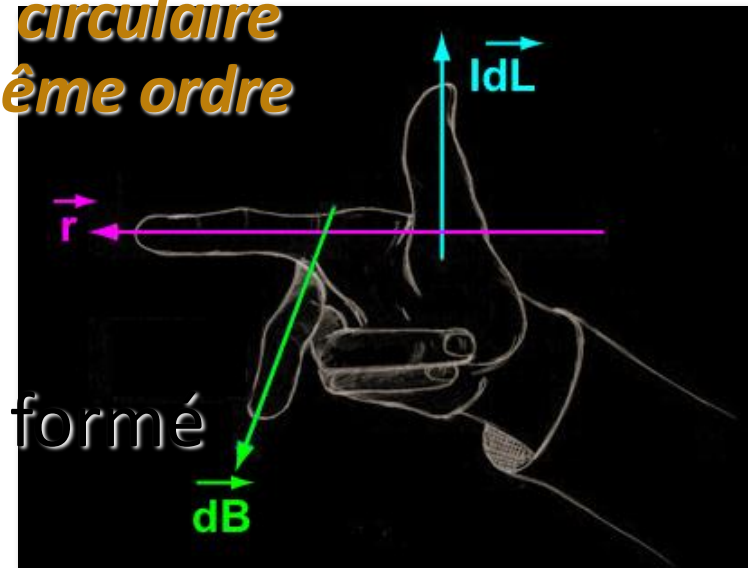
Norme de r



Donne le sens, la direction et l'intensité !

$$d\vec{B} = \frac{\mu_0}{4\pi} I d\vec{L} \wedge \frac{\vec{r}}{r^3}$$

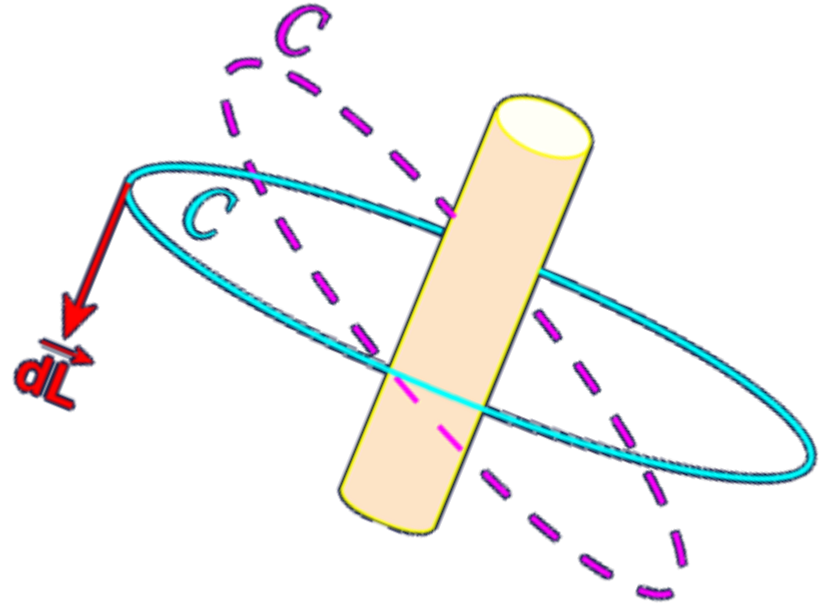
- Veut dire que **dB**, **dL** et **r** forment un *trièdre direct*
 - Pour cela on peut s'aider de la *main droite*
 - On peut faire une *permutation circulaire* des grandeurs, en gardant le *même ordre*
- **B** est perpendiculaire au plan formé par **dL** et **r**
 - Si **dL** // **r** alors **B** = 0
 - **B** prend sa valeur maximale pour **dL** ⊥ **r**



Calcul de B : le théorème d'Ampère

- Si l'on ne veut *que l'intensité* :
 - calculs plus simples !
- Soit une *courbe fermée C* entourant un ou plusieurs conducteurs :

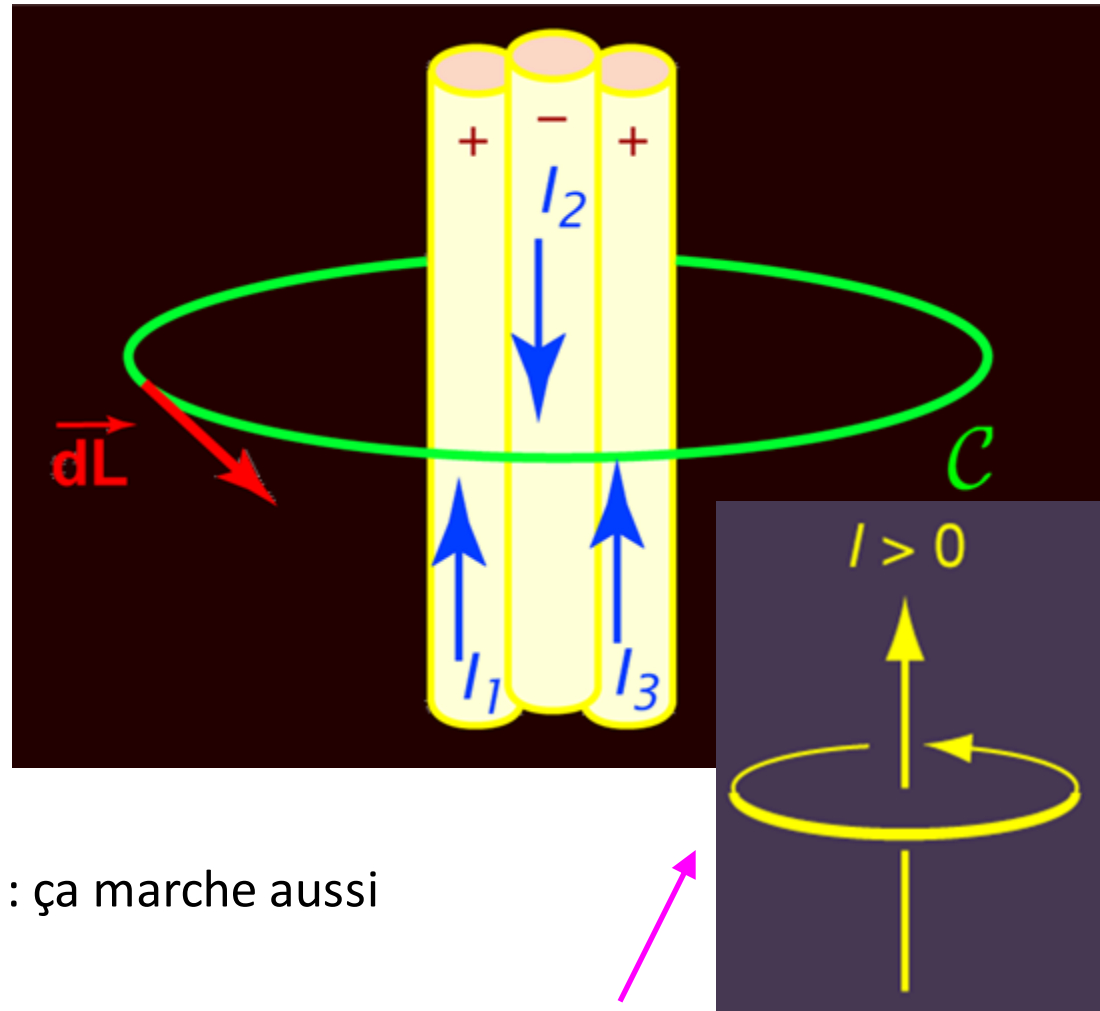
$$\int_C \vec{B} \cdot d\vec{L} = \mu_0 I$$



- **Attention** : dL est l'élément de longueur de la **courbe**
- Circulation du champ magnétique
- Somme algébrique : on prend en compte les signes !
- Utilisable quand on connaît la direction et le sens de **B** en *tout point de la courbe*

Le théorème d'Ampère : conventions

- On **choisit** le sens de $d\mathbf{L}$
- On utilise la règle du **tire-bouchon** (ou de la vis, ou de la main droite, etc.)
- Les courants qui **vérifient** la règle sont considérés comme **positifs**, les autres sont considérés comme négatifs
- Ici :
- Si l'on choisit $d\mathbf{L}$ dans l'autre sens : ça marche aussi



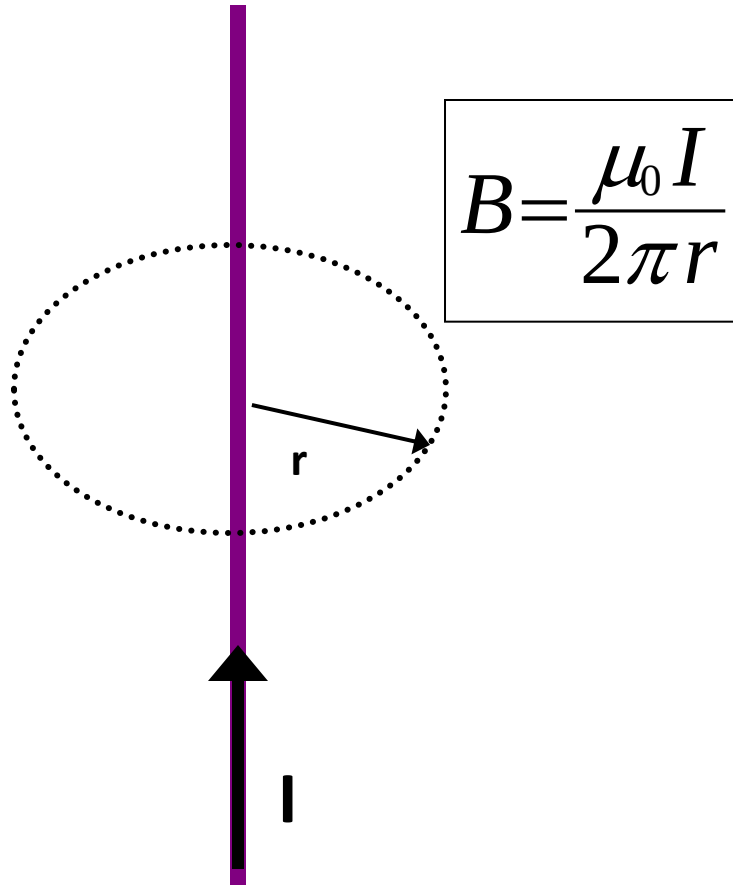
$$I = I_1 - I_2 + I_3$$

Sens de circulation (de $d\mathbf{L}$)

Théorème d'Ampère : remarques

- Le théorème d'Ampère
 - Ne donne *pas la direction*
 - Ne donne *pas le sens*
 - Nous renseigne *uniquement* sur *l'intensité* de $\mathbf{B}$
- On a intérêt à choisir, autant que possible :
 - Une courbe dont le périmètre est facile à calculer, et la plus cohérente possible
 - Une courbe telle que, autant que possible, $\mathbf{B} \parallel d\mathbf{L}$
 - Produit scalaire Calcul simplifié
 - Choisir une ligne de champ

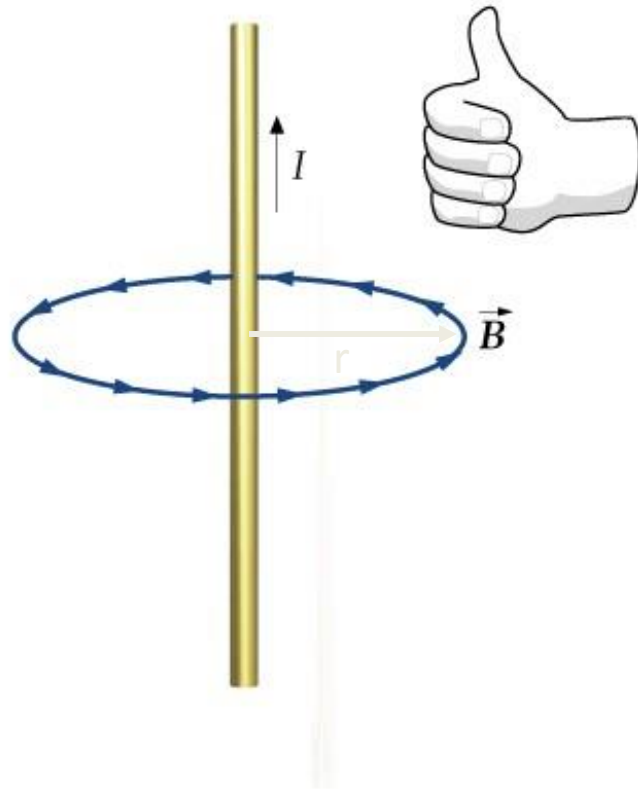
Champ magnétique produit par un long fil conducteur rectiligne



où B est le champ magnétique en tesla, I est le courant en ampère, r est la distance en mètre et μ_0 est une constante de proportionnalité appelée la perméabilité magnétique et valant $4\pi \times 10^{-7}$ tesla/ampère.

Unité du champ magnétique le *Tesla* (T)

Règle de la main droite



$$B = \frac{\mu_0 I}{2\pi r}$$

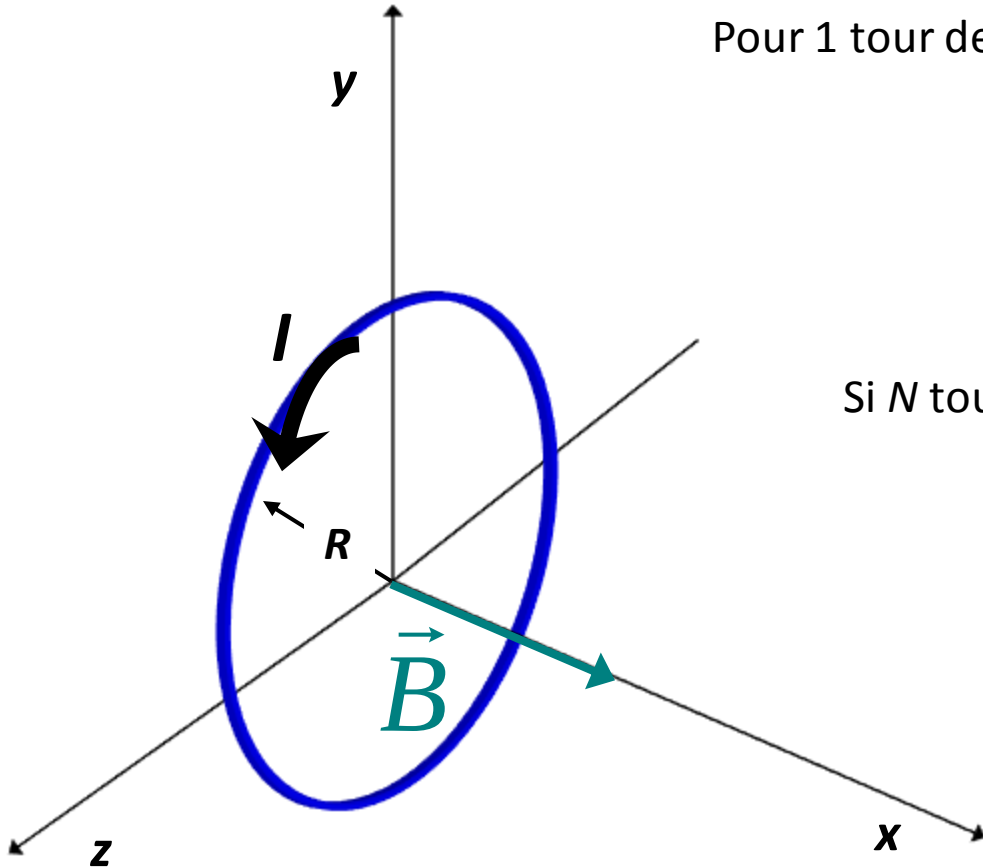
Pour un boucle de courant de rayon « **R** »

Pour 1 tour de fil:

$$B = \frac{\mu_0 I}{2R}$$

Si N tours

$$B = \frac{\mu_0 N I}{2R}$$



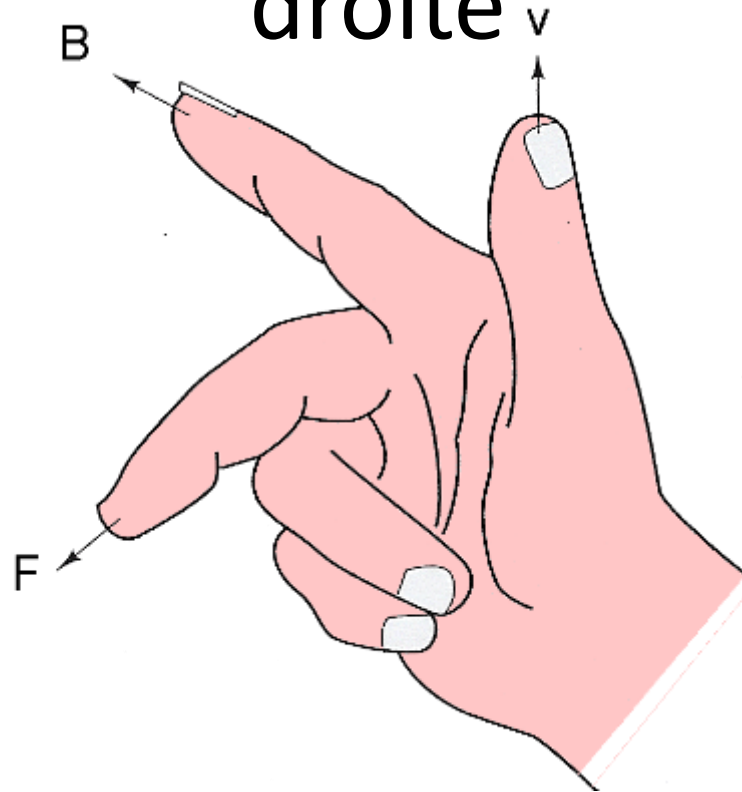
La force magnétique

Pour qu'un particule chargée ressente une force magnétique:

- a) la charge doit être en mouvement
- b) la vitesse de la charge doit avoir une composante perpendiculaire à la direction du champ magnétique.

La direction de la force est toujours perpendiculaire au vecteur vitesse et au champ magnétique B .

Force magnétique et règle de la main droite

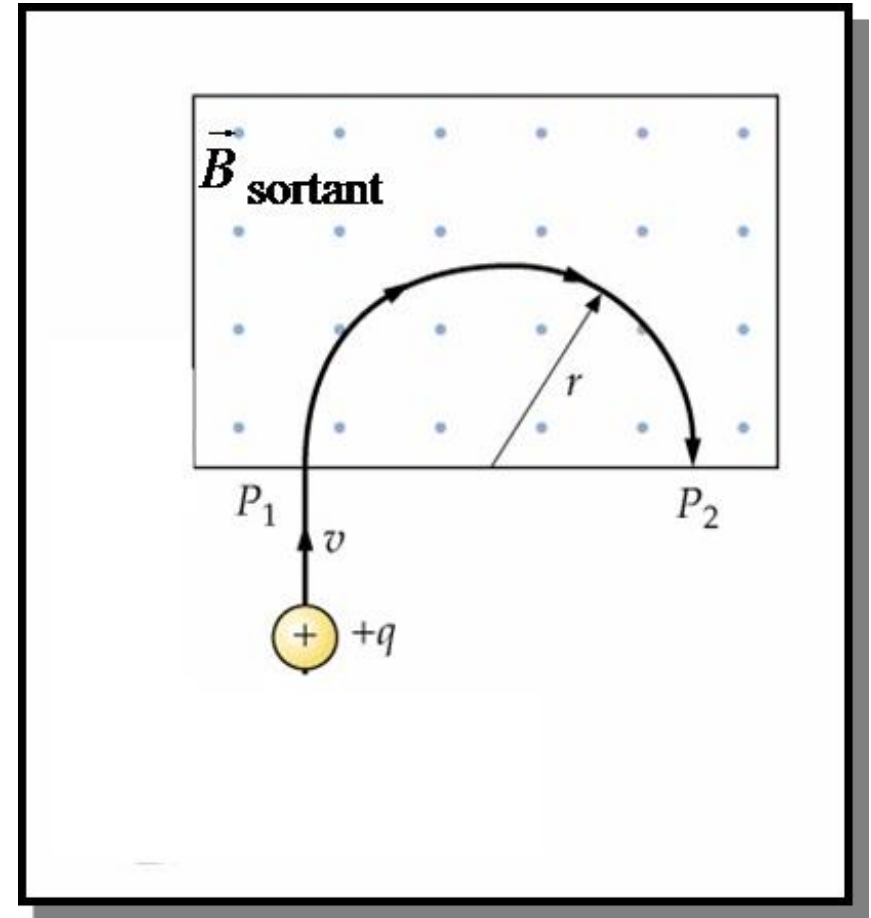


$$F = qvB \sin \theta$$

où θ est l'angle entre v et B

Force magnétique sur des charges en mouvement

$$F_{charge} = qvB = \frac{mv^2}{r}$$



$$r = \frac{mv}{qB}$$

9.1 Le champ magnétique créé par un long conducteur rectiligne

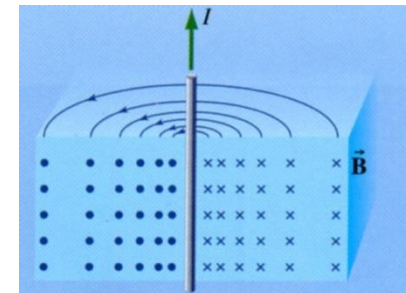
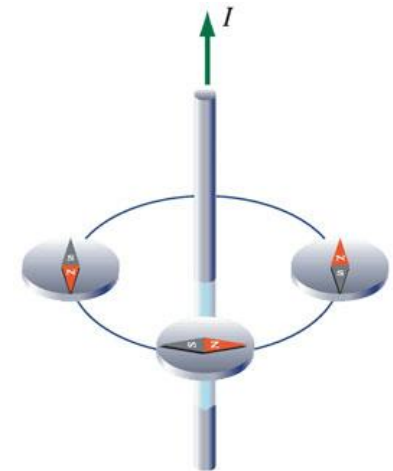
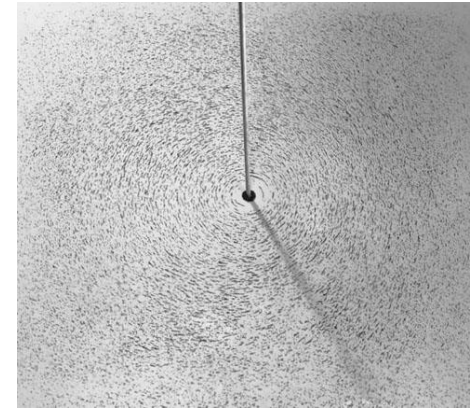
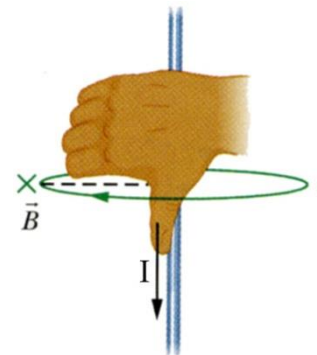
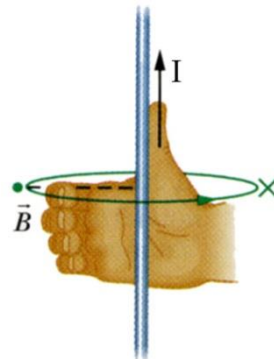
$$B = \frac{\mu_0 I}{2\pi R}$$

$$\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} \text{ T} \cdot \text{m/A}$$

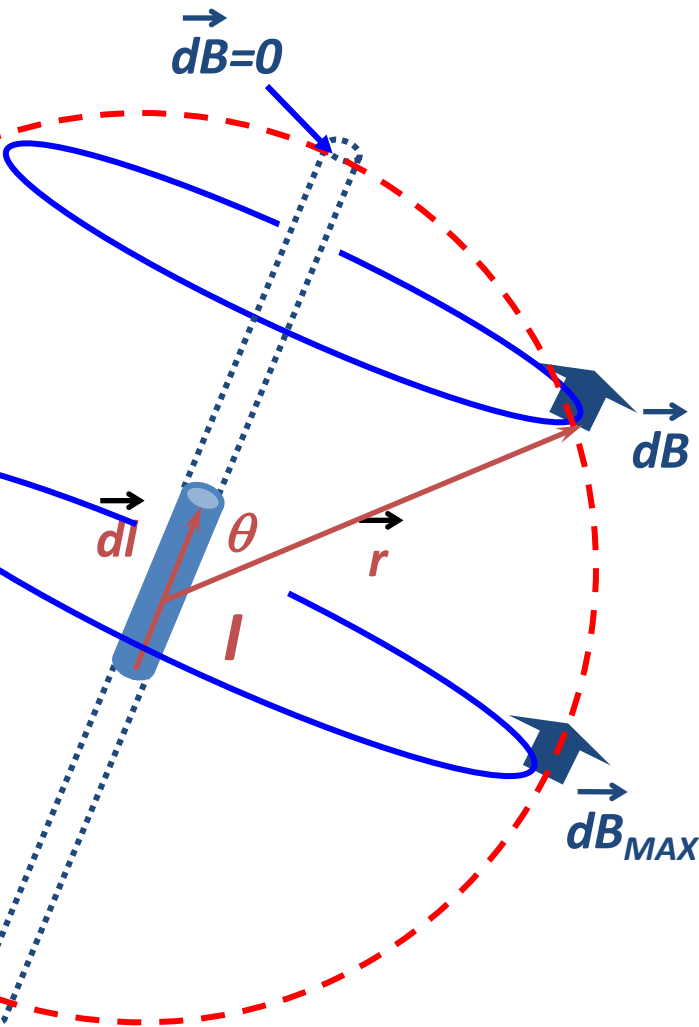
Module du champ magnétique B créé par un courant I circulant dans un fil rectiligne infini.

Les lignes du champ sont des cercles centrés sur le conducteur et perpendiculaire à celui-ci.

Le sens du champ magnétique est défini par la règle de la main droite.

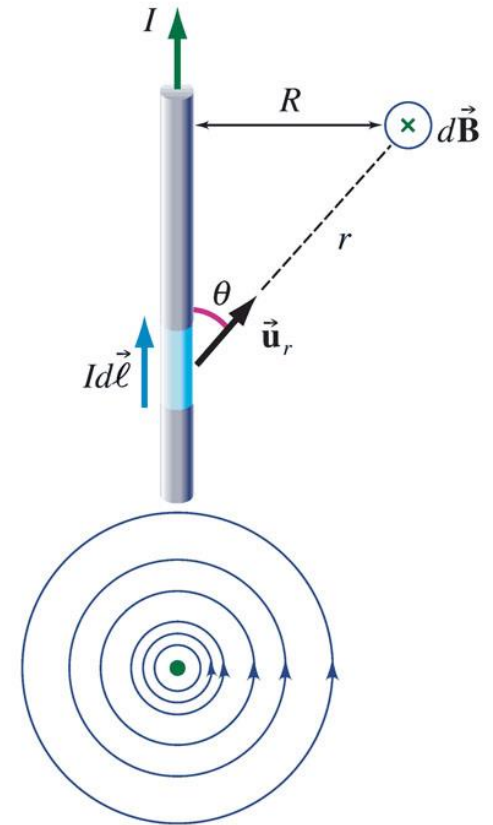


La loi de Biot-Savart



$$d\vec{B} = \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{Id\vec{\ell} \times \vec{u}_r}{r^2}$$

$$dB = \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{Id\ell \sin \theta}{r^2}$$



Le champ magnétique $d\vec{B}$ produit par un élément de courant diminue comme $1/r^2$, tout comme le champ électrique produit par une charge ponctuelle.

La loi de Biot-Savart sert à calculer le champ produit par un conducteur de forme quelconque.

Force magnétique entre deux fils parallèles

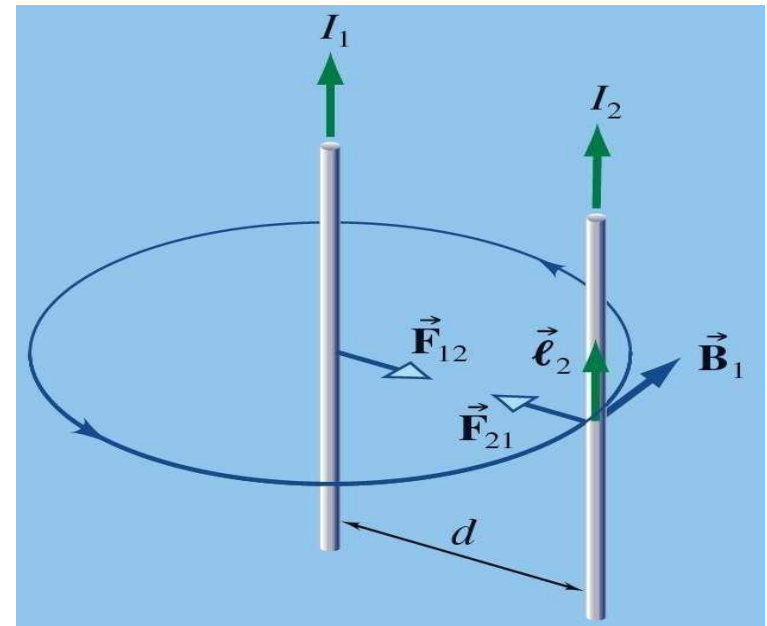
- Soit deux fils conducteurs, parallèles, séparés d'une distance d , et parcourus par les courants I_1 et I_2 ; la force créée par le champ $\vec{B}_1$, généré par le fil 1, sur le fil 2 est :

$$\vec{F}_{21} = I_2 \vec{l}_2 \times \vec{B}_1$$

$$\text{avec } B_1 = \frac{\mu_0 I_1}{2 \pi R} \text{ et } \vec{l}_2 \perp \vec{B}_1$$

$$\Rightarrow F_{21} = I_2 l_2 \frac{\mu_0 I_1}{2 \pi R}$$

$$\Rightarrow F_{12} = I_1 l_1 \frac{\mu_0 I_2}{2 \pi R}$$

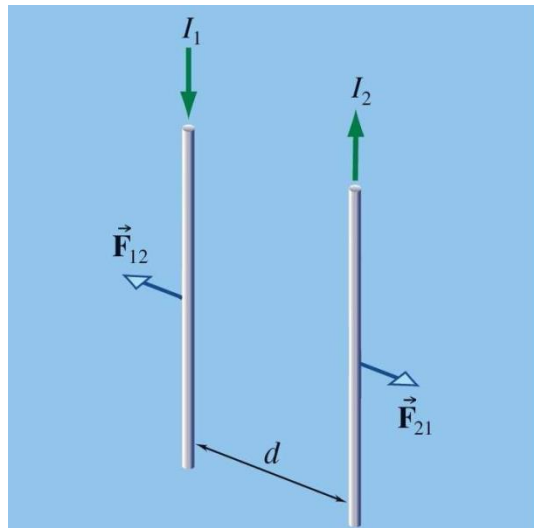


Force magnétique entre deux fils parallèles

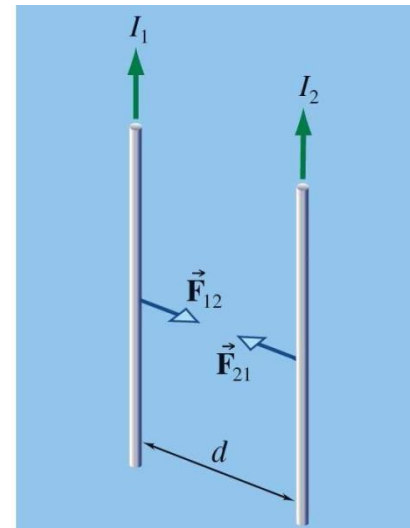
- La ***force par unité de longueur*** est :

$$\frac{F_B}{l} = \frac{\mu_0 I_1 I_2}{2\pi d} \left[\frac{N}{m} \right]$$

- d distance entre les fils
- I_1 et I_2 les courants des fils



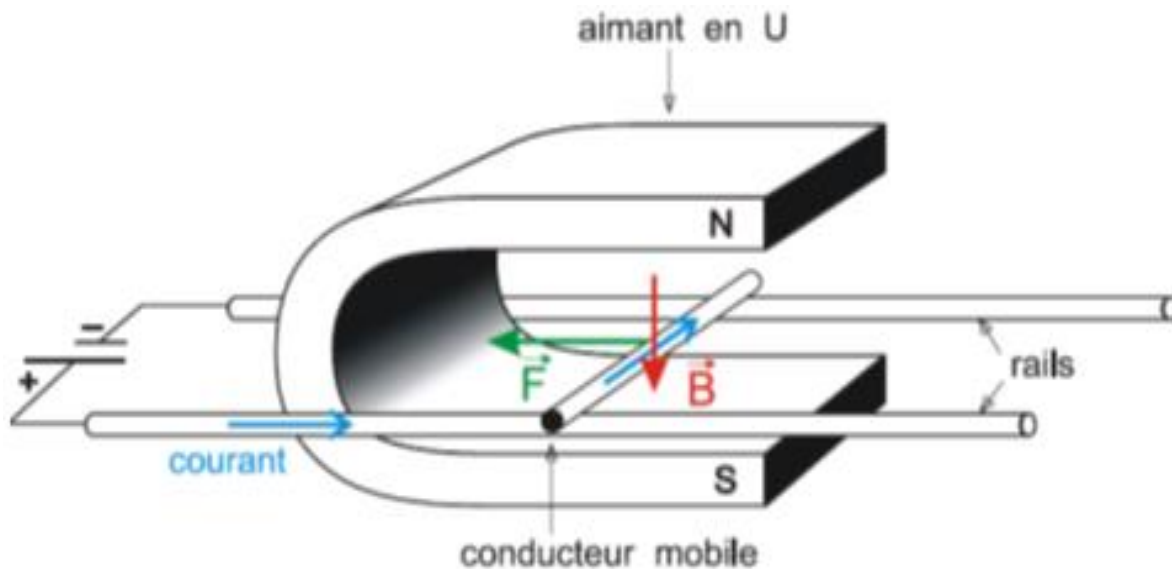
Courants opposés:
répulsion



Courants mêmes sens:
attraction

Un conducteur de longueur l , parcouru par un courant électrique d'intensité I , plongé dans un champ magnétique uniforme $\vec{B}$, est soumis à la force électromagnétique, appelée force de Laplace définie par

Cette expérience permet de déterminer les caractéristiques de la force de Laplace



A la fermeture du circuit la tige se déplace dans une direction perpendiculaire à elle-même.

Conclusion : La force de Laplace est perpendiculaire au conducteur et au champ .

$$\vec{F} = I \vec{l} \wedge \vec{B}$$

Enoncé de la loi

Un conducteur de longueur l , parcouru par un courant électrique d'intensité I , plongé dans un champ magnétique uniforme , est soumis à la force électromagnétique, appelée force de Laplace définie par

$$\vec{F} = \int_0^L I d\vec{L} \times \vec{B}$$

$$\boxed{\vec{F} = I \vec{l} \wedge \vec{B}}$$

Placé dans un champ magnétique, chaque électron du conducteur subit la force de Lorentz

$$\vec{F} = q \vec{v} \times \vec{B}$$

Afin de différencier le champ magnétique dans l'air qui est créé par le courant I et celui dans le fer, on considère deux champs magnétiques :

- Le champ magnétique d'excitation noté H qui ne dépend que des sources de champs, ici I , N et ℓ

$$H = \frac{N.I}{\ell}$$

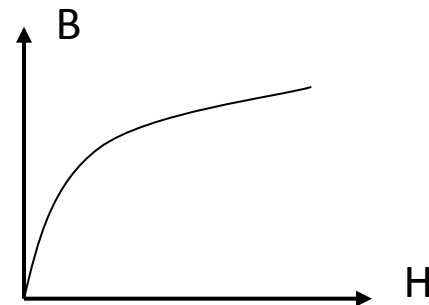
Unité de H : l'ampère par mètre :
 $A.m^{-1}$.

- Le champ magnétique d'induction B (ou champ magnétique seulement) qui dépend de H et aussi des propriétés d'aimantation du matériau.

$$\vec{B} = \mu_0 \vec{H} + \vec{\mathfrak{J}}$$

Ou usuellement

$$B = \mu.H$$



Courbe $B(H)$
d'un matériau
magnétique

Perméabilité magnétique

Considérons un solénoïde parcouru par I avec ou sans noyau de fer
Le champ B dans le fer est multiplié par μ par rapport au même champ dans l'air

$$\mu = \mu_r \cdot \mu_0$$

μ = perméabilité absolue en H/m

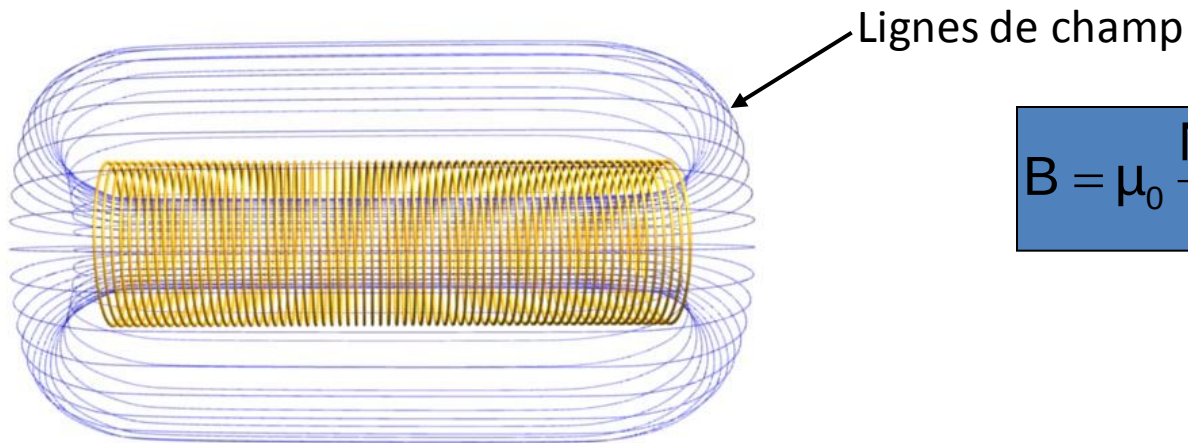
μ_r = perméabilité relative, sans unité

$$B = \mu \cdot \frac{N \cdot I}{\ell}$$

Valeurs: μ_r vaut quelques centaines à quelques milliers

μ_r diminue lorsque I augmente: saturation magnétique

Dans le vide, l'exemple du solénoïde: longueur ℓ , N spires parcourues par I

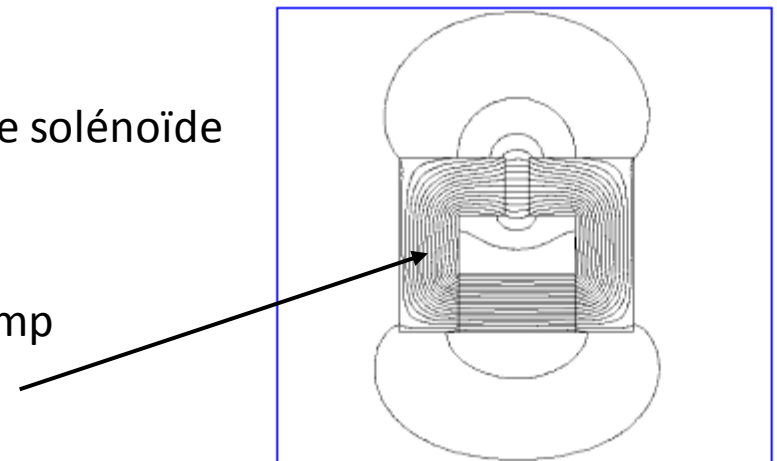


$$B = \mu_0 \frac{N.I}{\ell}$$

Influence de la présence d'un noyau de fer dans le solénoïde



Amplification du champ et
canalisation des lignes de champ



Perméabilité magnétique

Considérons un solénoïde parcouru par I avec ou sans noyau de fer
Le champ B dans le fer est multiplié par μ par rapport au même champ dans l'air

$$\mu = \mu_r \cdot \mu_0$$

μ = perméabilité absolue en H/m

μ_r = perméabilité relative, sans unité

$$B = \mu \cdot \frac{N \cdot I}{\ell}$$

Valeurs: μ_r vaut quelques centaines à quelques milliers

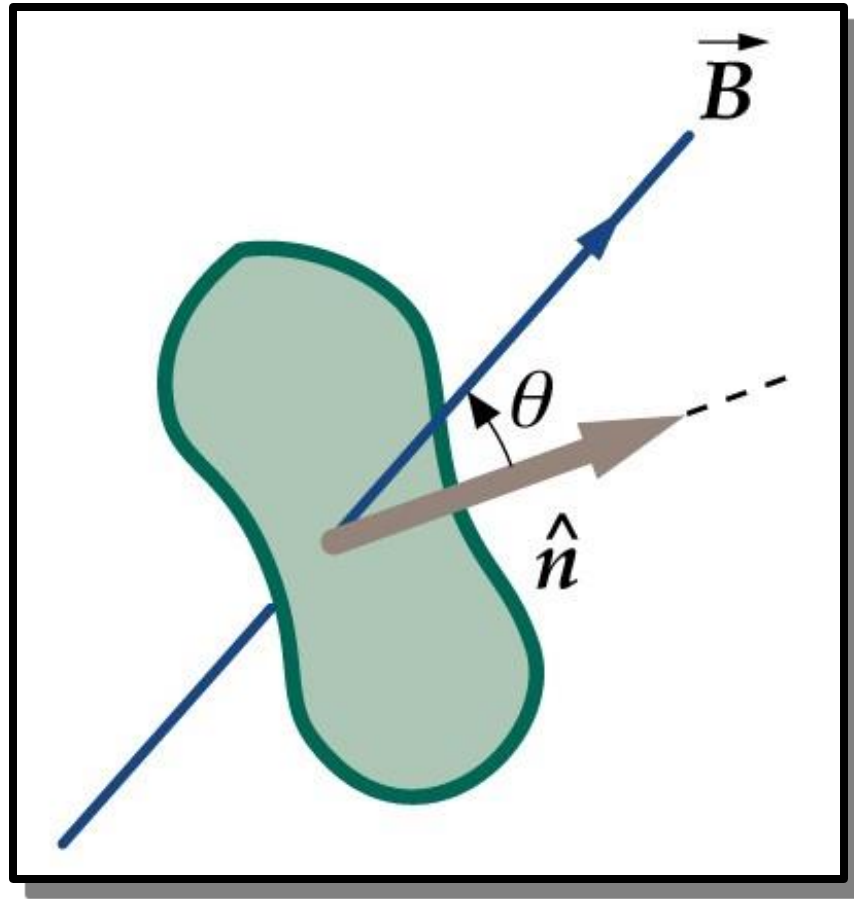
μ_r diminue lorsque I augmente: saturation magnétique

- Induction

- Le flux magnétique;
- La loi de Faraday;
- La loi de Lenz;

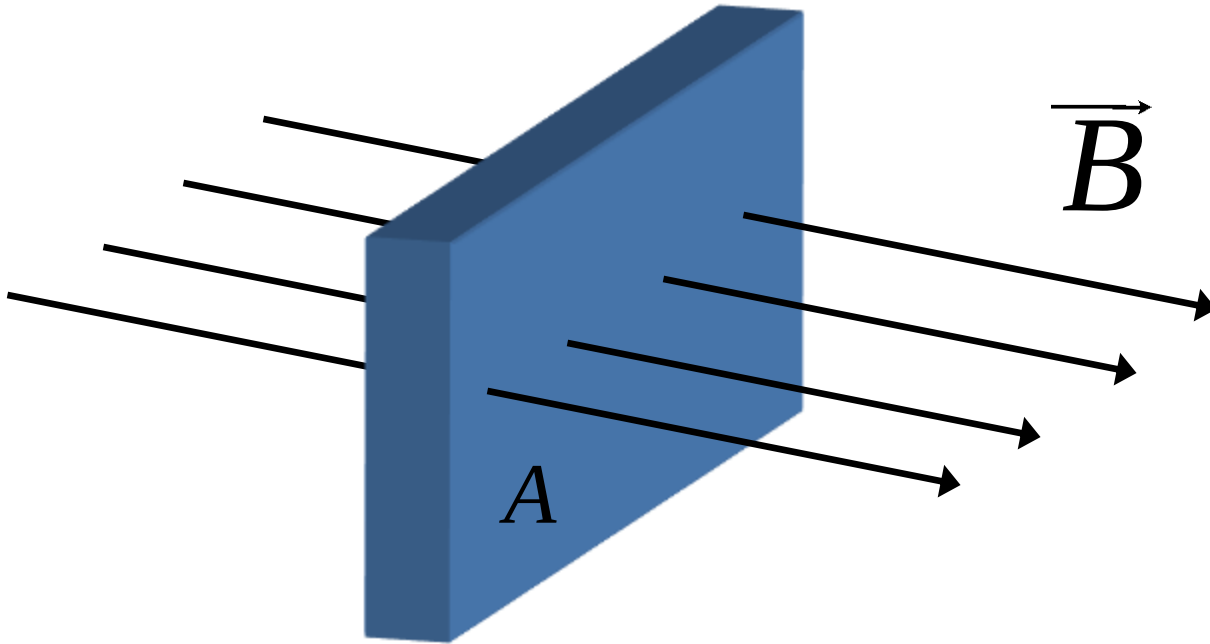
.

Flux magnétique



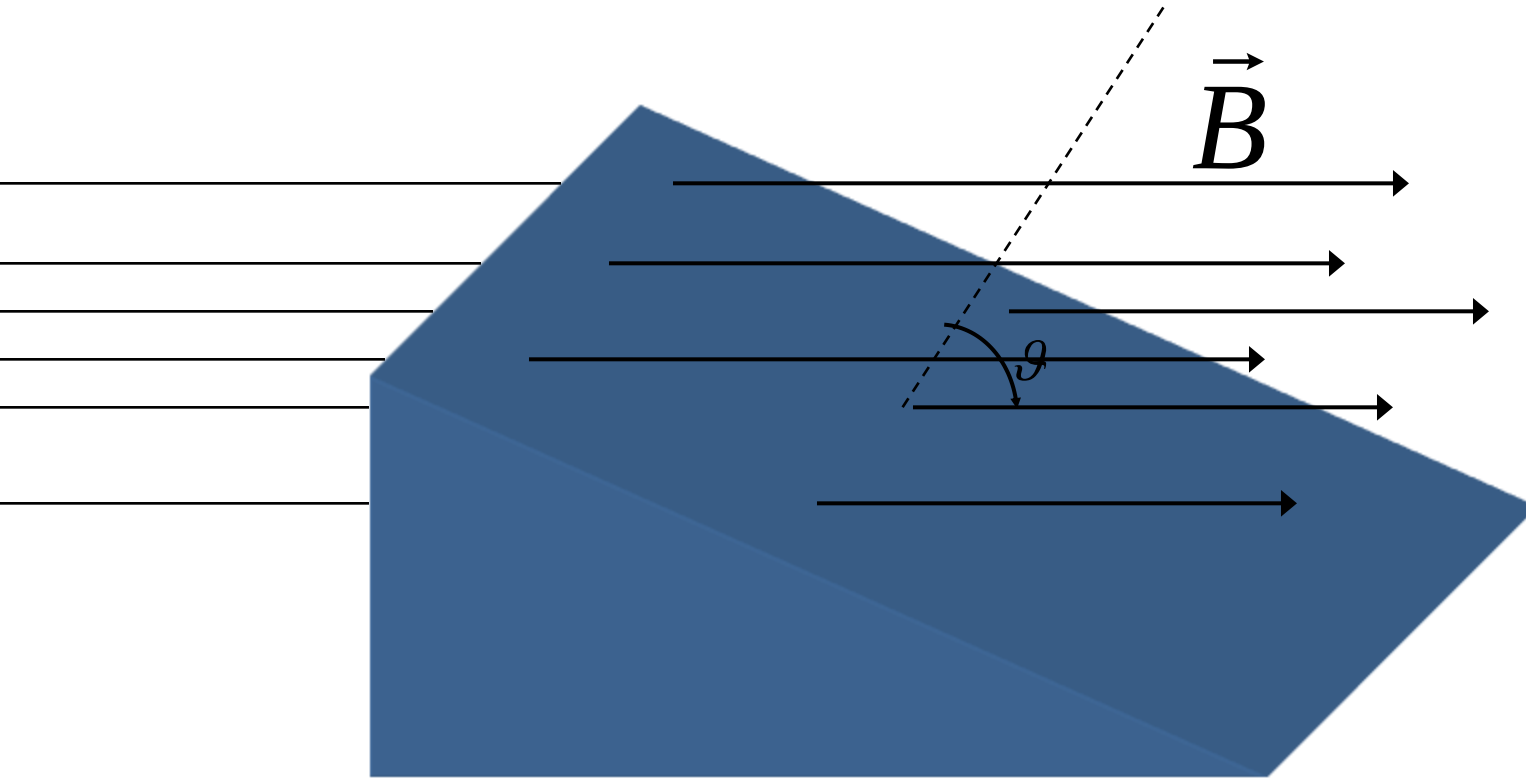
Flux magnétique: quantité mathématique représentant le nombre de lignes de champ magnétique traversant une surface.

Cas 1 Champ magnétique uniforme $\perp$ à la surface



$$\Phi_B = BA$$

Cas 2 Champ magnétique uniforme non $\perp$
à la surface



$$\Phi_B = BA \cos \theta$$

Loi de Faraday



Michael Faraday (1791-1867)

La *f.e.m. induite* dans un circuit fermé est proportionnelle au taux de variation du flux magnétique traversant la surface délimitée par le circuit.

$$\mathcal{E} = - \frac{\Delta \Phi_B}{\Delta t}$$

La loi de Lenz

L'effet de la *f.e.m. induite* est tel qu'il s'oppose à la variation de flux qui le produit.

